



## Spécificités des dégradations dans les bétons du patrimoine

Luc COURARD et Astrid LEJEUNE

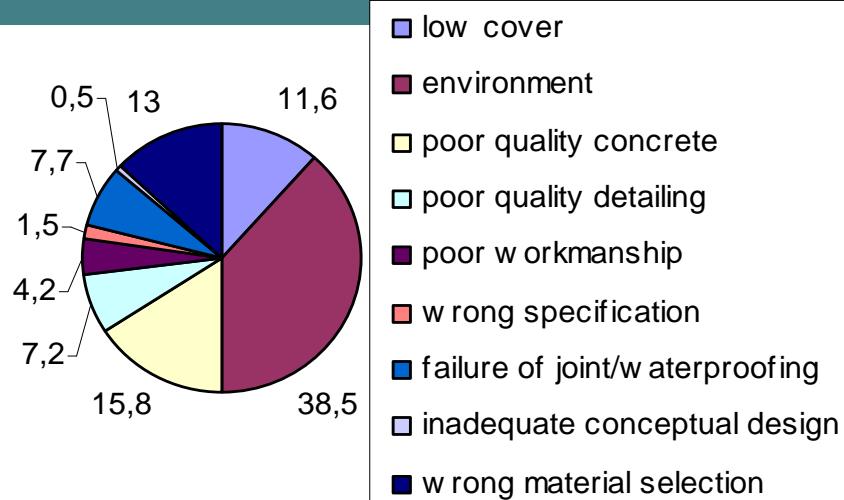
Université de Liège, Belgique

*Journée d'études, Beez, 9 novembre 2012*

### Situation actuelle



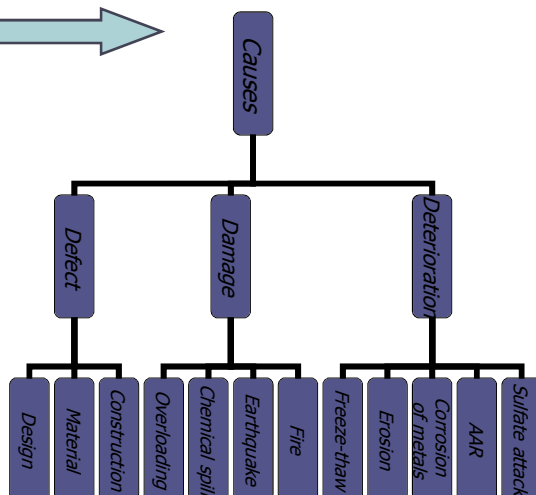
## Facteurs contribuant à la dégradation des structures en béton (BCA, 1997)



## Pathologies

Effets

lixiviation  
tassements  
déflexion  
usure  
épaufrure  
désintégration  
fissures  
délamination  
écaillage



## Pathologies

### Principaux effets

épaufrement  
désintégration  
fissures

### Cause première: **eau**

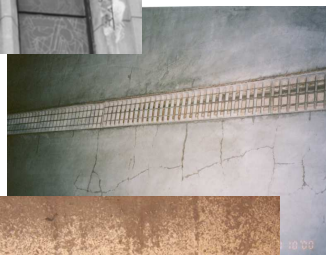
### Causes secondaires

corrosion des armatures  
mécanismes de désintégration  
effets de l'humidité  
fautes de conception ou de réalisation



*Epaufures, église Saint-Vincent, Baie du Chœur (NO)*

*Fissures de retrait  
(Photo B. Chmilievska)*



*Désintégration, trémie Ville de Liège*

## Relations de cause(s) à effet(s)

Causes des dégradations	Effets			
	Fissure	Epaufrement	Désagrégation	Activité
<b>A. Causes survenant avant durcissement :</b>				
1) ségrégation du béton	x			x
2) ressasse	x			x
3) retrait à l'état plastique	x			x
<b>B. Causes survenant au début et pendant le durcissement</b>				
1) modification du support ou du coffrage	x	x		x
2) effet du gel sur béton jeune	x	x	x	x
3) retrait	x			x
<b>C. Causes survenant après durcissement :</b>				
1) effet thermique				
- déformation empêchée/différentielle	x	x		xx
- gel/dégel		x	x	xx
- incendie	x	x	x	x
2) effet de l'eau				
- effet absorption d'eau/séchage (+ déformation empêchée ou différentielle)	x	x		xx
3) effet chimique				
- attaque en surface			x	xx
- réaction chimique avec expansion	x	x	x	xx
4) corrosion des armatures	x	x		xx
5) surcharge mécanique/ concentration de tension				
- statique	x	x		xx
- dynamique	x	x		xx
- impact et tremblements de terre	x	x		x
- érosion			x	xx

## Sommaire

Défauts courants  
Corrosion par piqûre  
Carbonatation  
Désintégration du béton

Diagnostic  
Conclusions

## Défauts de construction

Recouvrement des armatures: de l'ordre de 15mm

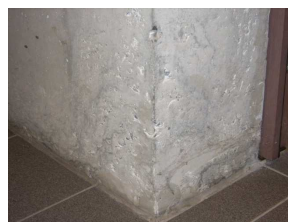
Compaction: par piquage → nids de gravier

Ségrégation, reprise de bétonnage

Retrait plastique, tassement plastique

Défauts de pente (évacuation de l'eau)

*ségrégation*



*reprises de bétonnage*



*tassement plastique*



*retrait plastique*

## Défauts structurels

Tassement différentiel

Dilatation thermique

Surcharges accidentelles (neige, tremblement de terre)

### Infiltration d'eau



Humidité au plafond  
(église Saint-Vincent)



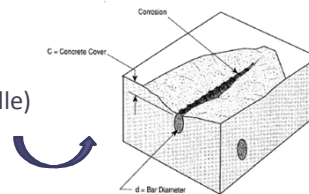
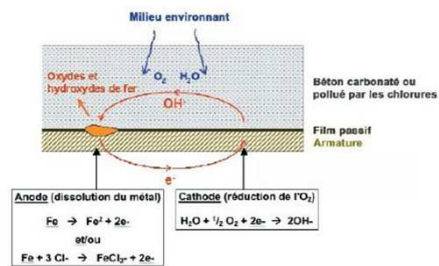
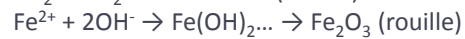
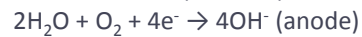
Fissure dans la partie centrale  
du linteau (Orientation Est,  
église Saint-Vincent)

Fissuration  
verticale dans un  
pilier (Abside SO,  
église Saint-  
Vincent)



## Corrosion des armatures

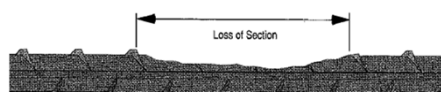
Les réactions sont les suivantes :



## Corrosion par les chlorures

### Corrosion par piqûres

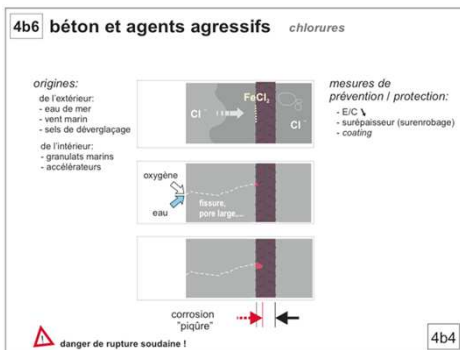
formation de  $\text{FeCl}_2$   
réduction de la capacité structurale  
taches et coulures de rouille



CSTC, 2008

## Corrosion par les chlorures

Corrosion par les chlorures (Bains de la Sauvenière, arch. G. Dedoyard, 1942)



Groupement  
Belge du Béton

Bains de la Sauvenière



## Corrosion par les chlorures

### Chlorures provenant de

l'environnement: eau de mer, sels de déneigement

l'intérieur

$\text{CaCl}_2$  comme accélérateur de prise

« Ingrédients » naturels avec les granulats (sable de dunes) ou l'eau (eau de mer)



Police fédérale, Saint-Léonard, 2006



## Corrosion par les chlorures

### Teneur admissibles en ions chlorures

EN 206-1: 2000

Utilisation du béton	Classe de chlorures	Teneur maximum en $\text{Cl}^-$ rapportée à la masse de ciment
Ne contenant ni armature en acier ni pièces métalliques noyées	Cl 1,0	1%
Contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées	Cl 0,20	0,20%
	Cl 0,40	0,40%
Contenant des armatures de précontrainte en acier	Cl 0,10	0,10%
	Cl 0,20	0,20%

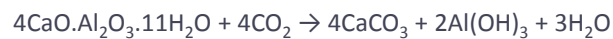
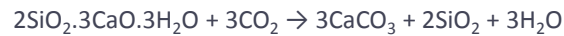
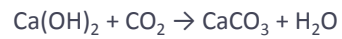


Contexte belge



## Corrosion par carbonatation

### Réactions chimiques



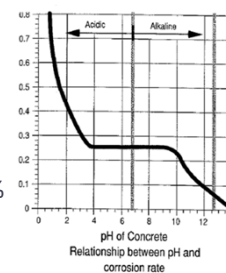
### Effets

Résistance en compression ↑

Porosité ↓:  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$  avec ↑ volume 11%

pH ↓ à cause de la consommation de  $\text{Ca(OH)}_2$

Taux de corrosion (mm/an)



## Corrosion par carbonatation

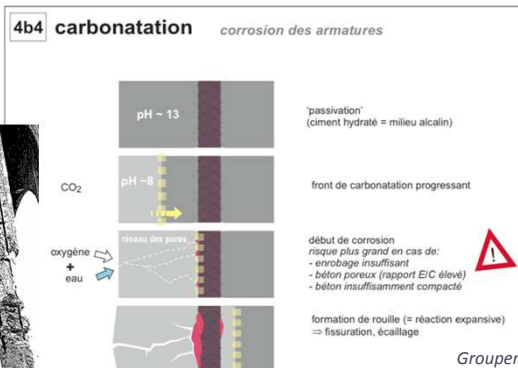
### Evolution

$$s = k \cdot \sqrt{t}$$

s = profondeur de carbonatation

t = temps

k = constante





## Corrosion par carbonatation

### Evolution

$$s = k \cdot \sqrt{t}$$

$s$  = profondeur de carbonatation

$t$  = temps

avec  $k = \sqrt{2 \cdot D_B \cdot C_1 / a}$  = constante de carbonatation

$D_B$  = coefficient de diffusion (porosité, H.R.)

$C_1$  = concentration en  $\text{CO}_2$

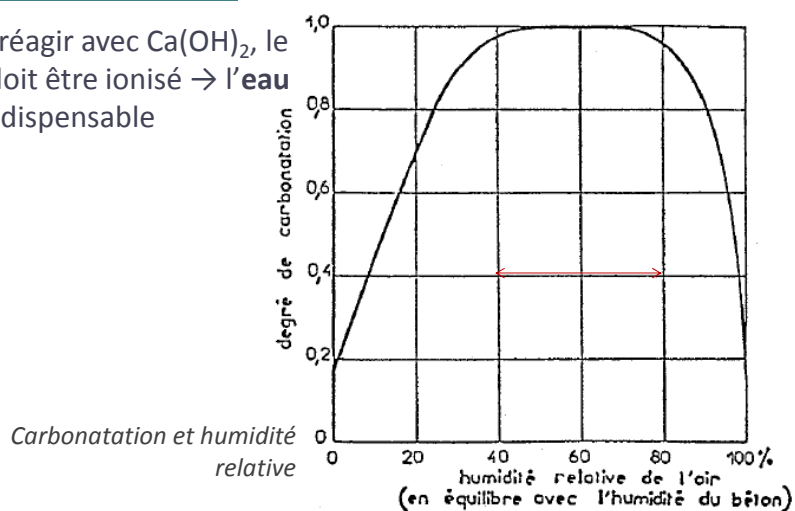
$a = f(\text{teneur en produits carbonatables})$

si  $[\text{Ca}(\text{OH})_2] \uparrow$  alors  $a \uparrow$  et  $k \downarrow$

$[\text{Ca}(\text{OH})_2] = f(\text{ciment}, \text{type de ciment}, [\text{additions}])$

## Corrosion par carbonatation

Pour réagir avec  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , le  $\text{CO}_2$  doit être ionisé → l'eau est indispensable



## Corrosion par carbonatation

### Teneur en CO<sub>2</sub>

Air:  $\pm 600 \text{ mg/m}^3$  (0.03% volume)

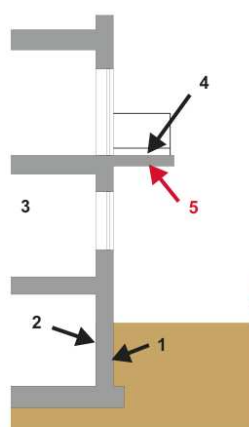
Environnement urbain: 600 to 2000  $\text{mg/m}^3$

### Vitesse de pénétration

$f_{ck}$ (MPa)	15	25	35	45	55
$D_B(\text{cm}^2/\text{s})$ (non exposé à la pluie)	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$0.6 \cdot 10^{-4}$	$0.25 \cdot 10^{-4}$
$D_B(\text{cm}^2/\text{s})$ (exposé à la pluie)	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$0.9 \cdot 10^{-4}$	$0.5 \cdot 10^{-4}$	$0.3 \cdot 10^{-4}$	$0.12 \cdot 10^{-4}$

## Corrosion par carbonatation

### 4b4 carbonatation *risque de corrosion: cas concrets*



- 1- sous terre ou sous eau:  
carbonatation limitée (peu ou pas de CO<sub>2</sub>)  
⇒ pas de corrosion
- 2- cave:  
carbonatation avec effet favorable: bouche-pores
- 3- espace intérieur:  
faible humidité ambiante  
⇒ pas de corrosion
- 4- à l'extérieur mais non couvert  
en cas de pores très fins:  
⇒ peu d'oxygène au droit des barres  
⇒ faible risque de corrosion
- 5- à l'extérieur et couvert:  
pores tantôt remplis d'eau (humidité de l'air),  
tantôt secs (contact avec l'oxygène)  
⇒ **risque de corrosion !**  
(en cas de béton poreux ou d'enrobage insuffisant)

Groupement  
Belge du Béton

## Corrosion par carbonatation

### Apparition d'épaufrures (église Saint-Vincent, Liège)



Structure en béton armé supportant le dôme



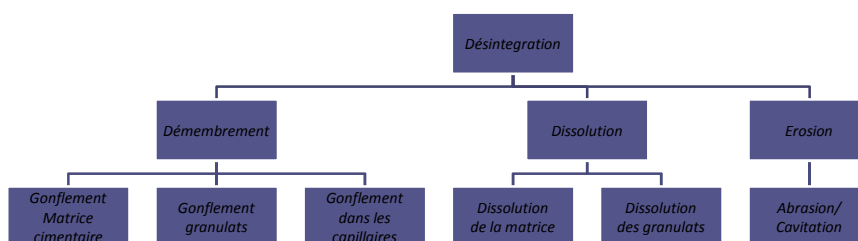
Epaufrures sous un appui de fenêtre

Epaufrure dans la pierre armée Pauchot (cage d'escaliers)



## Désintégration

### Mécanismes de désintégration



## Désintégration

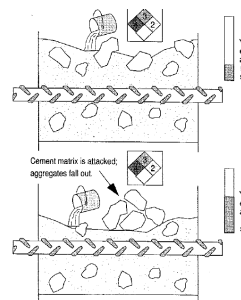
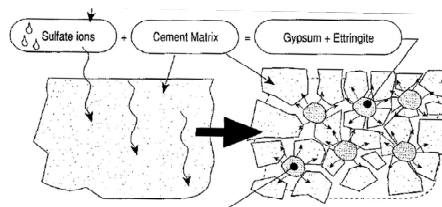
### Mécanismes de désintégration

Exposition à des substances chimiques agressives

réaction acide + base  $\rightarrow$  sel + eau

Attaque sulfatique

production d'ettringite secondaire



## Désintégration

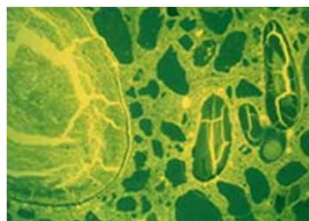
### Mécanismes de désintégration

Attaque bactérienne

production d'acide sulfurique

Réaction alcali-silice

réaction entre les granulats siliceux et les alcalins du ciment

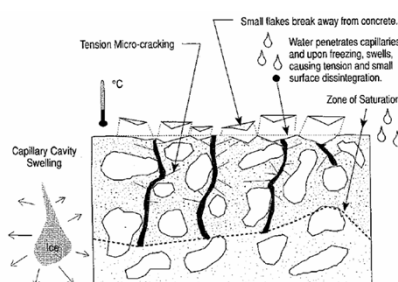


## Désintégration

### Effet du gel

Eau: rare élément à avoir un volume plus important à l'état solide qu'à l'état liquide (pour une masse équivalente).

La masse de l'eau ne change pas quand elle se solidifie mais son volume varie et augmente d'environ 10 %.

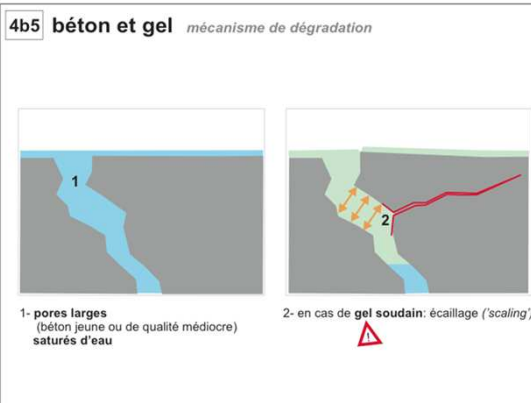


## Désintégration

### Effet du gel

Mise en traction de la couche superficielle du béton

Fissuration



## Diagnostic

### Inspection générale

Inspection visuelle

Examen global

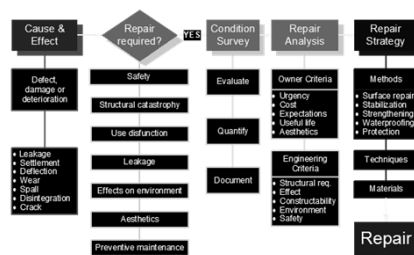
### Inspection spécifique (expertise)

Corrosion

Intégrité du support

Résistance

Contamination chimique



Méthodes d'analyse destructives et non destructives

**Prévoir un budget !**

## Spécificités des monuments historiques en béton

Qualité variable du béton

Faible recouvrement des armatures

Corrosion des armatures par carbonatation

Effet des cycles de gel-dégel

Nécessité d'un diagnostic complet



*Merci pour votre attention*